

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

SROVNÁNÍ METOD PRO LOKALIZACI UVNITŘ BUDOV

COMPARISON OF METHODS FOR INDOOR LOCALIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Povolný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Povolný

ID: 184069

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Srovnání metod pro lokalizaci uvnitř budov

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy lokalizace předmětů/zařízení uvnitř budov a prostudujte metody využívající k tomuto účelu technologie LoRa a ZigBee. Informace čerpejte z novějších konferenčních/časopiseckých článků z databáze IEEE Xplore. Navrhněte koncept řešení umožňující určit polohu předmětů v prostoru. Vyberte vhodné komponenty a moduly pro měřicí zařízení, navrhněte obvodová zapojení, vytvořte podklady pro desky plošných spojů a ty realizujte.

Oživte veškeré části měřicího zařízení, naprogramujte příslušné kontrolní prvky a proveďte základní testování vámi vytvořené koncepce. Zaměřte se na minimalizaci chyby určení pozice a na vhodnou vizualizaci výsledků. Vytvořte popis navržených modulů a funkcí a zveřejněte je na GitHubu, či podobném úložišti open source projektů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ROZUM, Stanislav, Jan KUFA a Ladislav POLAK. Bluetooth Low Power Portable Indoor Positioning System Using SIMO Approach. In: 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) [online]. IEEE, [cit. 2020-01-30]. DOI: 10.1109/TSP.2019.8769114. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8769114/>

[2] ROZUM, S. a J. SEBESTA. SIMO RSS measurement in Bluetooth low power indoor positioning system. In: 2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) [online]. IEEE, [cit. 2020-01-30]. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2018.8376391. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8376391/>

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá tematikou lokalizace osob či objektů pomocí IoT technologií ZigBee a LoRa™. Jsou zde probrány možnosti metod lokalizace, parametry užívaných technologií a seznámení se s existujícími moduly dostupnými na trhu. Výsledkem praktické části je návrh desek plošných spojů, základního odzkoušení hardwaru a softwaru a zpracování měřených dat pro lokalizaci pomocí RSS.

KLÍČOVÁ SLOVA

lokalizace, IoT, LoRA, LoRaWAN, ZigBee, ESP8266, RSSI, ToA, TDOA, AOA

ABSTRACT

The bachelor thesis is in theoretical part focused on the ideas of the localization of people or objects, using the IoT technologies, namely ZigBee and Lora™. The possible methods of localization are mentioned, with the mention of parameters of the used technologies and the overview of existing modules that are obtainable on the market. The result of a practical part is design of PCBs, the basic testing of hardware and software and the analysis of the obtained data.

KEYWORDS

localization, IoT, LoRA, LoRaWAN, ZigBee, ESP8266, RSSI, ToA, TDOA, AOA

POVOLNÝ, Ondřej. *Srovnání metod pro lokalizaci uvnitř budov*. Brno, 2020, 54 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Srovnání metod pro lokalizaci uvnitř budov“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Tomáši Frýzovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Též bych rád poděkoval svému známému panu Bc. Janu Vykydalovi za důležitou pomoc při řešení kritického problému v práci.

Obsah

Úvod	11
1 Teoretická část bakalářské práce	12
1.1 Internet věcí - IoT	12
1.1.1 Historie	12
1.1.2 Příklady využití IoT	13
1.2 Teorie lokalizace	14
1.2.1 Time of Arival (TOA)	14
1.2.2 Angle of Arrival (AoA)	16
1.2.3 Received signal strength (RSS)	17
1.3 Užité technologie	18
1.3.1 LPWAN	18
1.3.2 WPAN	19
1.3.3 Omezení kmitočtového pásma	19
1.3.4 LoRa™ a LoRaWAN™	20
1.3.5 ZigBee	21
1.4 Dostupné moduly	22
1.4.1 LoRaWAN™	23
1.4.2 ZigBee	25
2 Výsledky bakalářské práce	26
2.1 Proč bylo zvoleno měření RSSI?	26
2.2 Měřicí server - LoRa™	26
2.2.1 Výběr komponent	26
2.2.2 Konstrukční řešení	27
2.3 Uzel sítě LoRa™	27
2.3.1 Výběr komponent	27
2.3.2 Konstrukční řešení	29
2.4 Uzel sítě/měřicí server ZigBee	30
2.5 Programové řešení LoRa™	30
2.5.1 Uzel sítě	31
2.5.2 Měřicí server	31
2.6 Metodika a výsledky měření	33
2.6.1 Rozmístění modulů	33
2.6.2 Získání hodnot modelu	34
2.6.3 Vyhodnocení měření	35

3 Závěr	37
Literatura	38
Seznam symbolů, veličin a zkratk	44
Seznam příloh	47
A Měřicí server LoRa	48
A.1 Schéma zapojení	48
A.2 Deska plošného spoje serveru	49
B Uzel sítě LoRa	50
B.1 Schéma zapojení	50
B.2 Deska plošného spoje serveru	51
C ZigBee modul	52
C.1 Schéma zapojení	52
C.2 Deska plošného spoje	53
D Obsah přiloženého CD	54

Seznam obrázků

1.1	Ukázka trilaterace pomocí TDOA (A,B,C přijímače, X vysílač) s odlišeným výsledkem pro dosazení (1.6) do (1.4) (modře) a (1.7) do (1.5) (oranžově)	16
1.2	Triangulace pro AoA pro 2 měřící body a jeden neznámý	17
2.1	Osazená deska LoRa™ měřícího serveru	28
2.2	Osazená deska LoRa™ uzlu	30
2.3	Osazená deska ZigBee modulu	31
2.4	Diagram volání funkcí serveru	32
2.5	Měřící lokalita	33
2.6	Schéma rozmístění modulů	34
2.7	Závislost RSSI na vzdálenosti	35
A.1	Schéma zapojení měřícího serveru	48
A.2	DPS serveru - strana součástek	49
A.3	DPS serveru - strana spojů	49
B.1	Schéma zapojení uzlu sítě	50
B.2	DPS uzlu - strana součástek	51
B.3	DPS uzlu - strana spojů	51
C.1	Schéma zapojení ZigBee modulu	52
C.2	DPS ZigBee modulu - strana součástek	53
C.3	DPS ZigBee modulu - strana spojů	53

Seznam tabulek

1.1	Frekvence ISM pásem (převzato z [13])	20
1.2	Frekvence SRD pásem(převzato z [14])	20
1.3	Přehled možných konfigurací pro vysílání (převzato a upraveno z [11])	21
1.4	Přehled možných rychlostí podle frekvenčního pásma (převzato z [16])	22
2.1	Technické parametry ATMega328P	29
2.2	Výsledné hodnoty modelu a vypočtená chyba v metrech	36

Seznam výpisů

2.1	Struktura navracené zprávy	31
-----	--------------------------------------	----

Úvod

V moderní době vznikají stále větší nároky na lokalizaci osob a objektů v zástavbě, např. pro sledování pohybu zaměstnanců v prostoru s vysokými fyzickými nároky, případně s nezanedbatelnou šancí na zranění či újmu na zdraví. Bohužel standardně užívané systémy lokalizace, založené na satelitní navigaci, jsou nedostačující v uzavřených, případně zastavěných prostorech z důvodu nedostatečné propustnosti navigačních signálů. Další možné technologie, např. WiFi, které je možné užít pro danou lokalizaci, však vykazují větší nároky na spotřebu, je tedy problematická jejich minimalizace a provoz z malých zdrojů.

Díky rozvoji v oblasti IoT však vznikají v moderní době technologie, které vykazují lepší vlastnosti pro užití v přenosných zařízeních s nízkou spotřebou. Tato práce se primárně věnuje technologiím LoRaTM a ZigBee a jejich využití pro možnost lokalizace osob a objektů v zástavbě. Dále jsou představeny možné metody realizace laterace objektů, existující moduly dostupné na trhu a některé z jejich parametrů.

Cílem praktické části bakalářské práce je realizace a odzkoušení zvoleného řešení a získání měřících dat. V praktické části je prezentován návrh modulů přijímače a vysílačů užitím technologií LoRaTM a ZigBee, programového řešení řízení a metodiky testování laterace spolu s provedeným základním měřením funkcionality pro lateraci pomocí RSSI. Závěrem jsou probrány možné způsoby minimalizace chyb měřených hodnot a je provedena diskuze získaných hodnot.

1 Teoretická část bakalářské práce

1.1 Internet věcí - IoT

Internetem věcí (IoT, anglicky Internet of Things) rozumíme síť propojených zařízení, která normalizovaným způsobem dovolují předávání informací mezi zařízeními (označovaných jako věci) pro vytvoření inteligentního ekosystému dovolující vylepšení funkce jednotlivých věcí na základě proměnlivosti vnějších vlivů. Mezinárodní telekomunikační unie definuje IoT v doporučení ITU-T Y.2060 [1] jako globální infrastrukturu pro informační společnost, dovolující rozšíření služeb skrze fyzické i virtuální propojení věcí založeném na nynějších a rozvíjejících se informačních a komunikačních technologiích. Web je v IoT definována v tomto doporučení jako objekt ve fyzickém či informačním světě, který je schopen identifikace a integrace v rámci komunikačních sítí

1.1.1 Historie

Pojem Internet of Things je přisuzovaný Kevinu Ashtonovi z Procter & Gamble, který jej definoval v roce 1999 [2]. V rámci této koncepce přisuzoval vysokou důležitost využití RFID. Užití RFID pro IoT Ashton následně rozvinul v rámci MIT Auto-ID Center.

Prvním zařízením, které se dá označit jako věc v rámci IoT, byl automat na Colu na Carnegie Mellon University v roce 1982. Tento automat byl schopen odesílat do školní sítě informace ze senzoru o teplotě a stavu naplnění automatu [3].

V průběhu 90. let se koncept IoT objevoval opakovaně, například u Marka Weisera z Xerox PARC, který ve své práci "The Computer of the 21st Century" [4] navrhuje koncepci "ubiquitous computing", tedy koncepci počítačových zařízení (nejen počítačů) přístupných kdekoli a kdykoliv. Dle Weisera tato zařízení musí mít poznání o své lokalitě a mít dostatečně malou spotřebu, aby mohla pracovat z baterie (koncepty, na kterých v dnešní době staví věci v rámci IoT), jako jeden z příkladů uvádí elektronické poznámkové bloky, tedy resistivní dotykové obrazovky spojené bezdrátově se serverem, které by na rozdíl od klasického počítače nebyly vlastnictvím jednoho člověka, ale mohly by být používány kýmkoli a kdekoli v lokalitě.

Později v 90. letech došlo ke vzniku prvotních pokusů o standardizovaný komunikační systém mezi kancelářskými zařízeními, např. Microsoft At Work, dovolující zařízením jako jsou tiskárny či faxy komunikovat dle jednotného standardu pracujícího pod Microsoft Windows, koncept ne nepodobný užití PostScriptu u síťových tiskáren.

V prvním desetiletí 21. století byla koncepce IoT s rozvojem miniaturizace a využití nových komunikačních technologií a protokolů jako 3G či IEEE 802.11 nadále rozvíjena. Dle Cisco Systems v případě definice IoT jako "bod, ve kterém je více zařízení či věci připojených k internetu než je osob", vznikla koncepce IoT v roce 2008 či 2009. [5]

1.1.2 Příklady využití IoT

Internet věcí je možné užít v mnoha oblastech lidské činnosti pro doplnění automatizace, zvýšení efektivity zpracovávání a otevření nových možností. V rámci IoT existuje mnoho konceptů, zde se zmíníme o některých z nich:

Smart City

Smart City označuje využití senzorů a komunikačních systémů pro zvýšení kvality života ve městech. Cílem koncepce Smart City je např. zvýšení kvality, výkonu a propojení městských služeb, snížení vzniku odpadu a zvýšení kontaktu mezi obyvatelstvem a zastupitelstvem města.

Jedním s příkladů je v Nizozemí v přístavu Moerdijk systém chytrých světel společnosti Tvilight [6], který mění jas jednotlivých LED lamp v závislosti na pohybu osob ve večerních hodinách díky integrovaným pohybovým senzorům ve světlech, což dovoluje snížení energetických nákladů a množství světelného smogu. Tato data jsou předávána do systému CityManager, kde je možné provádět optimalizace a kontrola všech osvětlení v areálu přímo na obrazovce počítače.

Smart Homes

Smart Homes označuje využití senzorů a komunikačních systémů pro zlepšování kvality života v domácnosti skrze propojení domácích spotřebičů v rámci sítě. Cílem koncepce je např. zlepšení zabezpečení domácnosti (chytré zámky, domácí zvonky s kamerou), snížení spotřeby energií (dálkově ovládaná světla a klimatizace) atd.

Jedním s příkladů jsou moderní virtuální asistenti jako Amazon Alexa či Google Home - tyto moduly reagují na lidský hlas a dovolují ovládání jiných domácích modulů či provádění interakce uživatele s Internetem.

Smart Agriculture

Smart Agriculture označuje využití senzorů a komunikačních systémů pro využití a optimalizaci procesů v oblasti agrikultury. Cílem koncepce je např. snižování nákladů v zemědělství (kontrolou vlhkosti půdy, monitorováním počasí pro plánování výsadby), optimalizaci procesů (např. sledování úlové váhy pro hlídání snůšky) atd.

Smart Industry

Smart Industry označuje využití senzorů a komunikačních systémů pro optimalizaci a sledování procesů v průmyslu, primárně v rámci koncepce Industry 4.0 (idea Industry 4.0 je rozvoj automatizace, sítí, umělé inteligence, IoT atd. pro snížení nákladů a eliminaci či omezení lidského faktoru v průmyslu). Cílem koncepce je např. zvyšování spolehlivosti výrobního procesu (senzory monitorující stav manipulátorů), snížení prodlev a výrobních nákladů atd.

1.2 Teorie lokalizace

Lokalizaci objektů užitím systému přijímačů je žhavým tématem doby v rámci optimalizace a propojenosti zařízení, což však klade nároky na vývoj nových technologií,

Přestože existuje několik masivně užívaných systémů, shrnutých pod službou globálního družicového polohového systému (GNSS), např. GPS, jejich nevýhody v zástavbě omezují jejich využití a řešení těchto nevýhod přidává další překážky. Příjem služby GNSS v zástavbě či v podzemních prostorách je omezen, což je sice možné eliminovat zavedením opakovačů, toto řešení je však finančně náročné a jednotlivé opakovače mohou způsobovat interferenci signálu z důvodu jejich vzájemné interakce. Dále je nutné např. u systému GPS užití minimálně 4 družic pro lokalizaci (vyšší počet zpřesňuje lokalizaci), přičemž přesnost se pohybuje v řádu jednotek až desítek metrů. Pro mnohé aplikace je však tato přesnost nedostatečná a je vyžadována vyšší v řádu jednotek až desítek centimetrů.

Z tohoto důvodu existuje několik možných specializovaných způsobů lokalizace použitelných pro aplikaci popisovanou v této práci, které je možné rozdělit na dvě hlavní oblasti: [7].

- range based, což jsou způsoby založené na přímém měření vzdálenosti z naměřené fyzikální veličiny (do této kategorie spadá TDOA, TOA a AoA),
- range free - způsoby založené na síle přijatého signálu (RSS) a jejím převodu na hodnotu vzdálenosti pomocí modelu.

V této kapitole budou probrány hlavní možnosti range based a range free způsobů lokalizace.

1.2.1 Time of Arrival (TOA)

One-way TOA

Lokalizaci pomocí měření časového zpoždění je možné v nejjednodušším případě popsat z doby šíření signálu (TOF) v prostředí mezi vysílačem a přijímačem. V takovém případě předpokládáme, že vysílač odešle packet v čase t_1 a přijímač jej

přijme v čase t_2 . Poté rozdíl mezi časem přijetí a odeslání je (v ideálním případě, kdy je dokonalá synchronizace hodin přijímače a vysílače) dána vztahem

$$\tau_t = t_2 - t_1 \quad (1.1)$$

a poté pro vzdálenost platí

$$d_t = c \cdot \tau_t \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla. Tato metoda má několik hlavních nevýhod, a to nutnost kompenzace vícecestného šíření (je přijato více signálů s různými časy odeslání) a časový drift mezi moduly, který vyžaduje opakovanou resynchronizaci sítě. Problém resynchronizace je alespoň částečně omezen dvoucestným ToA, není však plně vyřešen vliv driftu.

Two-way ToA

Pro lokalizaci pomocí dvoucestného měření není nutná společná časová reference, místo toho se provádí měření obousměrného zpoždění. Vysílač po odeslání packetu vyčkává na odeslání potvrzení příjmu, toto odeslání probíhá s určitým zpožděním τ_d . Poté je obousměrné zpoždění dáno vztahem

$$\tau_r = 2\tau_t + \tau_d \quad (1.3)$$

kde τ_t je dáno vztahem (1.1). Dvoucestným měřením je eliminována nedokonalost synchronizace mezi moduly, z důvodu závislosti na zpoždění odpovědi τ_d je však možný větší vliv časového driftu, kdy i malá změna zpoždění je možným zdrojem velké chyby. [8]

Time Difference of Arrival (TDOA)

Dalším možným způsobem měření je užití rozdílu přijetí signálu, což je možné provést dvěma hlavními způsoby:

- odesláním signálů z několika synchronizovaných vysílačů na jeden přijímač a poté změřením časů přijetí signálů vysílačem, tj. multipoint-to-point
- plošným odesláním signálu z jednoho vysílače na několik synchronizovaných přijímačů a poté změřením časů přijetí, tj. point-to-multipoint

Pro soustavu rovnic v systému s jedním vysílačem a třemi přijímači platí [9]

$$\tau_{12} = t_1 - t_2 = \frac{d_1 - d_2}{c} = \frac{d_{12}}{c} \quad (1.4)$$

$$\tau_{23} = t_2 - t_3 = \frac{d_2 - d_3}{c} = \frac{d_{23}}{c} \quad (1.5)$$

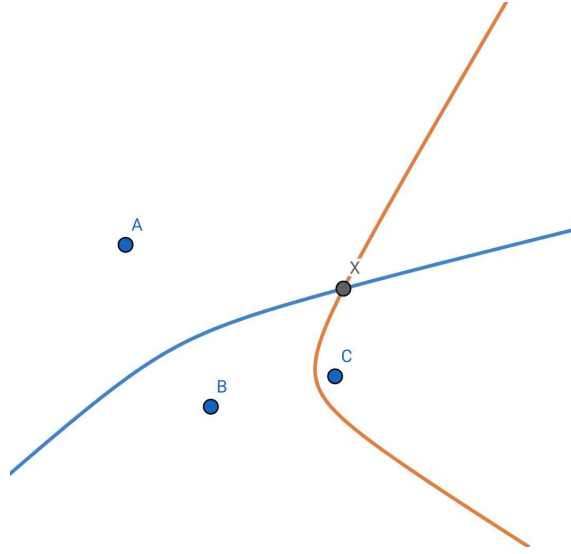
kde t_1 , t_2 a t_3 jsou časy příchoďů signálů od jednotlivých přijímačů, d_1 , d_2 a d_3 jsou neznámé vzdálenosti vysílače od jednotlivých přijímačů, c je rychlost světla a τ_{ij} je

časový rozdíl příchodu zprávy mezi dvěma přijímači. Pro vzdálenost uzlů je možné poté napsat

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_m)^2 + (y_1 - y_m)^2} - \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} \quad (1.6)$$

$$d_{23} = \sqrt{(x_2 - x_m)^2 + (y_2 - y_m)^2} - \sqrt{(x_3 - x_m)^2 + (y_3 - y_m)^2} \quad (1.7)$$

kde (x_1, y_1) , (x_2, y_2) a (x_3, y_3) jsou známé souřadnice jednotlivých přijímačů a (x_m, y_m) jsou souřadnice vysílače. Dosazením (1.6) do (1.4) a (1.7) do (1.5) dostaneme pro obě souřadnice 2 hyperbolické rovnice, tato situace je naznačena na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Ukázka trilaterace pomocí TDOA (A,B,C přijímače, X vysílač) s odlišeným výsledkem pro dosazení (1.6) do (1.4) (modře) a (1.7) do (1.5) (oranžově)

Jak je patrné, takový systém je velice náchylný na přesnost synchronizace, jeho výhodou je však eliminace kompenzace vícecestného šíření a zpoždění odpovědi, což dovoluje jeho větší přesnost.

1.2.2 Angle of Arrival (AoA)

Dalším možným způsobem lokalizace je měření úhlů přijetí signálu mezi vysílačem a několika přijímači [7]. Aby bylo možné tohoto měření provést, je nutné užití buď anténního pole, případně silně směrové sektorové antény. Poté je možné pomocí triangulace ze známých úhlů přijetí a vzdálenosti mezi měřícími body určit pozici objektu pomocí vztahu

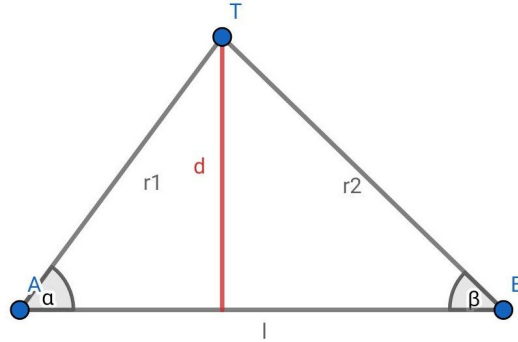
$$l = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta} \quad (1.8)$$

a poté je možné určit vzdálenost pomocí definice funkce sinus jako

$$r_1 = \frac{d}{\sin \alpha} \quad (1.9)$$

$$r_2 = \frac{d}{\sin \beta} \quad (1.10)$$

Schéma výše uvedeného je uvedeno na obrázku 1.2. Pro zvýšení přesnosti je však vhodné užít více měřících bodů pro přesnější triangulaci.



Obr. 1.2: Triangulace pro AoA pro 2 měřící body a jeden neznámý

1.2.3 Received signal strength (RSS)

Lokalizace pomocí RSS metod je založena na útlumu signálu mezi dvěma body, tj. že šířením signálu se dochází k útlumu, který je závislý na vzdálenosti mezi přijímačem a vysílačem. Díky tomuto není nutnému uvedených systémů řešit vliv časového driftu či synchronizace a úhlu antény, což dovoluje zjednodušení celého měřícího systému. Pro měření pomocí RSS je užíváno teoretických či empirických modelů útlumu signálu, jejichž přesnost ovlivňuje přesnost odhadu měření vzdálenosti [10].

Nejuzívanějšími modely pro útlum jsou path-loss modely (PLM). Obecně je možné pro RSSI (Received Signal Strength Indicator) ve vzdálenosti d uvést vztah

$$\text{RSSI} = C - \sum_{h=1}^m 10\mu_h \log \left(\frac{\langle d \rangle_{\delta_{h-1}}^{\delta_h}}{\delta_{h-1}} \right) \quad (1.11)$$

kde

- C - výkon signálu v referenční vzdálenosti δ_0 ,
- m - počet lineárních segmentů průběhu,
- μ_h - koeficient ztrát šířením v daném segmentu,

$\langle X \rangle_a^b = \min \{ \max \{ X, a \}, b \}$ a $0 < \delta_0 < \delta_1 < \dots < \delta_m = \infty$. Tento model, označovaný jako vícesměrníkový (multi-slope) je vhodné použít pro vnitřní prostory, je

však možné jej zjednodušit při předpokladu pouze jedné směrnice, tj. $m = 1$ na tvar

$$\text{RSSI} = C - 10\mu \log \left(\frac{d}{\delta_0} \right) \quad (1.12)$$

Poté úpravou z (1.12) dostáváme

$$d = 10^{\frac{\text{RSSI}-C}{-10\mu}} \cdot \delta_0 \quad (1.13)$$

Získaná hodnota vzdálenosti je poté užita ve výpočtu trilaterace jako poloměr kružnic vykreslených kolem jednotlivých vysílačů, pro každou kružnici poté určíme její středovou rovnici, čímž dostaneme soustavu n rovnic o $n - 1$ neznámých, kde n je počet modulů. Při užití 3 vysílačů tedy můžeme určit pozici přijímače v 2D rovině. Hlavní nevýhodou lokalizace pomocí RSS je silná závislost na útlumu signálu prostředí s překážkami. V takovém prostředí je výhodné užít vztahu (1.11), případně některý z jiných modelů, popsaných v [10]

1.3 Užité technologie

V práci byly použity technologie LoRaWANTM a ZigBee, představující dvě z možných oblastí technologií použitelných pro lokalizaci osob pomocí IoT a to sítě LPWAN a WPAN. V této kapitole jsou obě oblasti i technologie představeny a rozebrány.

1.3.1 LPWAN

Jako LPWAN rozumíme bezdrátovou technologii dovolující komunikaci na velkou vzdálenost při nízké spotřebě a nízkém vyzařovaném výkonu. Nízká spotřeba dovoluje systémům využívající technologii LPWAN napájení z malých zdrojů, např. z baterie, toto však omezuje bit rate mezi propojenými objekty na desítky kbit/s (např. LoRaWANTM dovoluje maximálně 50 kbit/s při použití FSK [11]), z tohoto důvodu není vhodná tato technologie na propojení mezi uživateli. Tato omezení jsou však výhodná pro komunikaci mezi senzory či IoT zařízeními, protože dovolují minimalizaci systémů.

Důležité je pro pochopení technologie LPWAN je její srovnání s jinými bezdrátovými technologiemi, hlavně s WiFi (IEEE 802.11) a s Bluetooth (IEEE 802.15.1). Nejčastější rozdíly mezi těmito technologiemi jsou ve spotřebě elektrické energie, v dosahu a v přenosové rychlosti.

Bluetooth jako zástupce technologií WPAN má oproti LPWAN nevýhodu v malém dosahu. Maximální dosah pro Bluetooth zařízení se pohybuje v řádu stovek metrů, zatímco pro LPWAN je tento dosah v rádech kilometrů. Výhodou tohoto

Bluetooth je však relativně velká přenosová rychlost (dle [12] má Bluetooth největší rychlost 2Mbit/s), pro IoT však malé přenosové rychlosti stačí.

WiFi představuje zástupce s velkou přenosovou rychlostí (802.11n dovoluje maximální rychlost až 600Mbit/s), hlavní nevýhodou je však velká spotřeba oproti Bluetooth a LPWAN a dosah v řádu stovek metrů. WiFi je proto problematická technologie pro užití v IoT, je však užitečná pro kontinuální přenos velkého odběru dat.

1.3.2 WPAN

Jako WPAN rozumíme bezdrátovou technologii dovolující komunikaci na malou vzdálenost mezi osobními zařízeními uživatele (počítače, PDA a podobně). Tyto technologie dovolují díky malé spotřebě jejich integraci do systémů napájených z malých zdrojů (např. baterií), přičemž díky malému dosahu je možné dosahovat i relativně vysokého bit-rate (např. pro ZigBee je možné dosáhnout až 250kbit/s při komunikaci na kmitočtu 2,4GHz), což dovoluje přenos i komplexnějších řídicích, obrazových a jiných dat.

Asi nejznámějším představitelem technologií WPAN je síť Bluetooth, tato technologie však není postavena pro použití v systémech s malým datovým tokem. Proto vznikl standard IEEE 802.15.4, kterým je definována technologie ZigBee.

1.3.3 Omezení kmitočtového pásma

Jak LPWAN, tak i PAN technologie standardně pracují v ISM pásmu, čímž je rozuměno bezlicenční pásmo pro rádiové vysílání využitelné pro účely průmyslu, výzkumu a medicíny. Pojem "ISM pásmo" je určeno dle ITU pro zařízení, která by mohla svou činností omezovat či interferovat s radiovou komunikací. ISM pásma pro region 1 (Evropa, Afrika, státy bývalého SSSR a Blízkého Východu) jsou zobrazeny v tabulce 1.1

V Evropě jsou dodatečně definována zařízení krátkého dosahu (SRD), čímž jsou rozuměna zařízení pracující s nízkým vysílacím výkonem a tedy i s nízkou úrovní rušení okolních zařízení při zachování určitých omezení. V České republice jsou tato omezení definována Českým telekomunikačním úřadem ve všeobecném oprávnění VO-R/10/01.2019-1 [14], kde jsou stanovena jednotlivá kmitočtová pásma pro SRD (viz tabulka 1.2)

V tabulce v [14] je dodatečně definován povolený maximální vyzářený výkon či intenzita elektromagnetického pole ve vzdálenosti 10m, povolená maximální šířka pásma a klíčovací poměr (podíl času, který v rámci jedné hodiny zařízení vysílá). V pásmech a až $h7$ není povolen přenos obrazových informací.

Tab. 1.1: Frekvence ISM pásem (převzato z [13])

Rozsah kmitočtů	střední kmitočet
6765 – 6795 kHz	6780 kHz
13553 – 13567 kHz	13560 kHz
26957 – 27283 kHz	27120 kHz
40,66 – 40,70 MHz	40,68 MHz
433,05 – 434,79 MHz	433,92 MHz
2400 – 2500 MHz	2450 MHz
5725 – 5875 MHz	5800 MHz
24 – 24,25 GHz	24,125 GHz
61 – 61,5 GHz	61,25 GHz
122 – 123 GHz	122,5 GHz
244 – 246 GHz	245 GHz

Tab. 1.2: Frekvence SRD pásem(převzato z [14])

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Ozn.	Kmitočtové pásmo
<i>a</i>	6765 – 6795kHz	<i>h1</i>	863,0 – 870,0MHz
<i>b</i>	13553 – 13567kHz	<i>h2</i>	863,0 – 870,0MHz
<i>c</i>	26957 – 27283kHz	<i>h3</i>	868,0 – 868,6MHz
<i>c1</i>	26995; 27045; 27095; 27145; 27195kHz	<i>h4</i>	868,7 – 869,2MHz
<i>d</i>	40,66 – 40,70MHz	<i>h5</i>	869,4 – 869,65MHz
<i>e</i>	138,20 – 138,45MHz	<i>h6</i>	869,7 – 870,0MHz
<i>f</i>	169,4 – 169,475MHz	<i>h7</i>	869,7 – 870,0MHz
<i>f1</i>	169,4 – 169,4875MHz	<i>i</i>	2400 – 2483,5MHz
<i>f2</i>	169,4875 – 169,5875MHz	<i>j</i>	5725 – 5875MHz
<i>f3</i>	169,5875 – 169,8125MHz	<i>k</i>	24,0 – 24,25GHz
<i>g</i>	433,05 – 434,79MHz	<i>l</i>	57 – 64GHz
<i>g1</i>	433,05 – 434,79MHz	<i>l1</i>	61,0 – 61,5GHz
<i>g2</i>	433,05 – 434,79MHz	<i>m</i>	122 – 123GHz
<i>h</i>	863,0 – 870,0MHz	<i>n</i>	244 – 246GHz

1.3.4 LoRa™ a LoRaWAN™

LoRa™ je technologie určená pro digitální bezdrátový přenos dat provozovaná společností Semtech ve spolupráci s decentralizovanou otevřenou sítí The Things Network a s organizací LoRa Alliance™. Technologie je rozdělena na dvě části – LoRa™

ve fyzické vrstvě, která je uzavřená a LoRaWANTM v ostatních vrstvách, která je otevřená. Využívá patentované LoRaTM modulace (CSS) pro přenos na velkou vzdálenost a GFSK modulace pro přenos větších objemů dat (max. 50 kbit/s), přenos probíhá v Evropě na SRD pásmu *h3* při šířce pásma 125kHz či 250kHz, užitá topologie sítě je hvězda hvězd. U LoRaWANTM rozlišujeme 8 možných konfigurací pro vysílání, zobrazených v tabulce 1.3

Tab. 1.3: Přehled možných konfigurací pro vysílání (převzato a upraveno z [11])

Datová rychlost (<i>DR</i>)	Činitel rozprostření (<i>SF</i>)	Modulace	Šířka pásma [kHz]	Přenosová rychlost [bit/s]	max. velikost zprávy [byte]
0	12	LoRa TM	125	250	59
1	11	LoRa TM	125	440	59
2	10	LoRa TM	125	980	59
3	9	LoRa TM	125	1760	123
4	8	LoRa TM	125	3125	230 (250 bez opakovače)
5	7	LoRa TM	125	5470	230 (250 bez opakovače)
6	7	LoRa TM	250	11000	230 (250 bez opakovače)
7		FSK		50000	230 (250 bez opakovače)

Přenos probíhá mezi senzory a serverem fungujícím jako přístupová brána. V rámci LoRaWANTM rozlišujeme tři hlavní třídy koncových zařízení

- třída A – koncová zařízení s nejnižším odběrem,
- třída B – koncová zařízení s určitou latencí pro downlink,
- třída C – koncová zařízení s nejnižší latencí.

Dle specifikace [11] je nutné pro každé zařízení zajistit tři přenosové kanály, a to 868,1 MHz, 868,3 MHz a 868,5 MHz. Pro zabezpečení je využito end-to-end šifrování s užitím 128-bitových klíčů pro komunikaci mezi koncovými zařízeními a přístupovou bránou za využití šifrovacího algoritmu AES.

1.3.5 ZigBee

ZigBee byla vyvinuta jako standard pro aplikace, pro které jsou hlavními limitacemi nízká přenosová rychlost, spotřeba a cena. Tento standard vznikl jako odezva na

některá zásadní omezení Bluetooth pro užití v průmyslových aplikacích (např. počet možných zařízení v síti - 7 u Bluetooth oproti 65000 u ZigBee [15]), je však dostatečně flexibilní, aby bylo možné jej užít i pro jiné aplikace.

Důležitým aspektem ZigBee je silné zaměření na užití digitalizace, kde jen je to možné. Moduly mají minimum analogových částí, chovají se tedy primárně jako softwarově definované rádio. Přenos probíhá v Evropě v pásmu *h3* a *i*, přičemž komunikace v pásmu *i* probíhá na 16 kanálech šířky 5MHz. Podle kmitočtu se odvíjí i maximální rychlost komunikace, což je shrnuto v tabulce 1.4.

Tab. 1.4: Přehled možných rychlostí podle frekvenčního pásma (převzato z [16])

Kmitočet[MHz]	Maximální rychlost
868	20
915	40
2400	250

Pro komunikaci používá ZigBee architekturu sítě mesh, sestávající ze tří typů zařízení [17]

- ZigBee coordinator – ZC – koordinátor
- ZigBee router – ZR – směrovač, specializované koncové zařízení
- ZigBee end device – ZED – koncové zařízení

Koordinátorem rozumíme zařízení tvořící kořenovou část stromu sítě, který může kromě řízení sítě též pracovat jako hraniční zařízení mezi dvěma ZigBee sítěmi a jako hlavní bezpečnostní autorita. Často se v tomto jedná o nejvýkonnější zařízení sítě.

Pro koncové zařízení je důležité, aby bylo schopné alespoň komunikovat s nadřazeným zařízením (koordinátorem, případně routerem), tato zařízení však nedokážou na rozdíl od routeru odesílat data mezi dvěma zařízeními. Tímto je však dosaženo nízké spotřeby, neboť koncová zařízení mohou být většinu svého provozu v režimu spánku. Dalším zlepšením spotřeby je použití modulace PSK (klíčování fázovým posuvem), přičemž pro komunikaci je PSK signál následně modulován přímým rozprostřením spektra (DSSS).

Pro zabezpečení je možné buď užívat access control listů, případně podobně jako u LoRaWAN™ AES.

1.4 Dostupné moduly

Pro obě technologie existuje na trhu mnoho modulů dostupných ve formě hotových řešení i jako DIY moduly. V této kapitole představíme některé z nich.

1.4.1 LoRaWAN™

LoRaWAN™ dovoluje vytvoření vlastní přístupové brány či vlastního koncového zařízení, existují však i hotová řešení. Protože LoRa™ je uzavřená technologie, veškerá řešení jsou založena na čipové sadě Semtech SX1XXX (např. SX1301 či SX1257).

Hotové přístupové brány

Pro LoRaWAN™ existuje několik hotových řešení, přehled je možné nalézt na [18] společně s odkazy pro bližší informace. Zde se zmíníme pouze o některých z nich.

The Things Gateway [19] vznikla jako výsledek Kickstarteru pro vytvoření levné přístupové brány s jednoduchou konfigurací pro užití s The Things Network a pro užití v DIY sféře. Jde o vícekanálovou přístupovou bránu pracující v Evropě na SRD pásmu *h3* a v USA na ISM pásmu pro region 2 (tj. 902 – 928MHz), přesněji na frekvenci 915 MHz.

- dosah: 10km ve volném prostoru
- rychlé nastavení ihned po vybalení

MultiConnect Conduit [20] je univerzální přístupová brána pro průmyslové využití IoT s možností rozšiřování pomocí modulů. Pro LoRa™ existuje modul ve formě rozšiřující karty využívající I²C, dovolující MultiConnect Conduit pracovat jak v evropském pásmu *h3*, tak i v USA na ISM frekvenci 915 MHz.

- podpora obousměrné komunikace
- dosah: 15km ve volném prostoru/2km v zástavbě

Laird RG1xx [21] je série přístupových bran určená pro privátní LoRaWAN™ síť s podporou LoRaWAN™, WiFi a Bluetooth. Jde o 8-kanálové brány pracující v SRD pásmu *h3* a v USA na ISM frekvenci 915 MHz.

- dosah: 10mil(cca 16km) ve volném prostoru

DIY přístupové brány

V rámci DIY řešení se zmíníme o modulech implementujících buď jen LoRa™ modulaci, nebo LoRaWAN™ protokol s LoRa™ modulací. V dnešní době na trhu existuje nepřeberné množství modulů, zmíníme se tedy jen o několika.

IMST iC880A [22] je modul 8-kanálové brány určený pro užití v SRD pásmu *h3*. Modul je určen pro užití společně s jednodeskovými mikropočítači jako Raspberry Pi či BeagleBone.

- citlivost přijímače: –137dBm

- podporovaná komunikace: SPI
- užitá čipová sada: Semtech SX1301
- dosah: 15km ve volném prostoru/několik km v zástavbě
- odběr: max. 428mA

RAK831 [23] je modul 10-kanálové brány podporující veškerá užívaná pásma podporovaných pro LoRa™ (ISM pásmo 433MHz, SRD pásmo *h3* a ISM pásmo 915MHz). Modul je určen pro užití s nějakým řídicím prvkem, např. Raspberry Pi, PC přes USB-SPI převodník, MCU komunikující přes SPI atd.

- citlivost přijímače: $-142,5\text{dBm}$
- podporovaná komunikace: SPI, USB
- užitá čipová sada: Semtech SX1301
- dosah: 15km ve volném prostoru
- odběr: RX 100mA, TX 80mA

Microchip RN2483 [24], [25] je rádiový modul implementující LoRaWAN™ protokol s podporou pásem ISM 433MHz a SRD *h3*. Modul je možné provozovat jako transceiver (vysílač i přijímač), a to jak pro přístupové brány, tak pro koncová zařízení.

- citlivost přijímače: -146dBm
- podporovaná komunikace: UART
- užitá čipová sada: Semtech SX1276
- dosah: 15km ve volném prostoru/5km v zástavbě
- odběr: přenos 38,9mA, v klidu 2,8mA

HopeRF RFM95 [26], [27] je rádiový modul implementující pouze LoRa™ modulaci s podporou veškerých užívaných pásem pro LoRa™. RFM95 je možné provozovat jako transceiver, a to jak pro přístupové brány, tak pro koncová zařízení. U tohoto modulu je možné kromě SPI komunikace využít 5 GPIO pinů.

- citlivost přijímače: -146dBm
- podporovaná komunikace: SPI
- užitá čipová sada: Semtech SX1276
- odběr: přenos max. 120mA, příjem max. 12,1mA

Koncová zařízení

Pro LoRaWAN existuje neskutečně velké množství různých modulů bez i se senzory, pohybujících se od senzorů sledujících hladinu oxidu uhličitého a teploty (např. LVRCO2 od AUTHENTIC DATA CO., LTD) přes parkovací senzory (např. S200LR od INTERCOMP S.p.A.) až po kompletní řešení pro meteorologické stanice (např.

CERERE od AXATEL SRL). Přehled modulů certifikovaných LoRa Alliance™ je možné nalézt na [28]. Pro DIY řešení je možné užít např. moduly RN2483 a RFM95 představené v předchozí části.

1.4.2 ZigBee

Koncová zařízení

Protože ZigBee je průmyslovým standardem, existuje pro koncová zařízení nesčetně velké množství modulů bez i senzory, užívaných např. pro domácí automatizaci. Některé příklady zařízení certifikovaných ZigBee Alliance je možné nalézt např. na [29], pro DIY řešení je možné použít např. moduly koordinátorů, uvedených v následující části.

Koordinátory

Asi nejznámějším výrobcem koordinátorů je Digi International Inc. a jejich systém modulů Digi Xbee®, v nynější době ve své 3. verzi. Z tohoto důvodu zmíníme pouze jejich 2 hlavní série modulů

Digi ConnectCore® je série jednodeskových ARM mikropočítačů, použitelných jako koordinátory. Přehled je možné nalézt např. v [30]

Digi Xbee®3 [31], [32] je série modulů použitelných jako veškeré možné typy modulů sítě v ZigBee. Moduly je možné provozovat jako transceivery, přičemž není nutné je provozovat s externím řízením pomocí mikrokontroléru, moduly je možné programovat a provozovat individuálně pomocí jazyka MicroPython.

- citlivost přijímače: -103dBm
- podporovaná komunikace: SPI, UART, I²C
- podporovaná konfigurace: API, AT příkazy, OTA
- odběr: přenos max. 40mA, příjem max. 17mA

2 Výsledky bakalářské práce

V praktické části bude vytvářen systém laterace objektu pomocí RSSI užitím technologií LoRaTM a ZigBee.

2.1 Proč bylo zvoleno měření RSSI?

RSSI bylo zvoleno z důvodu jeho jednoduché implementace v rámci měření lokality objektu při nízké vzdálenosti. Oproti AoA není nutné pro měření RSSI užívat směrové antény a je tedy možné použít standardní půldipólové antény a oproti ToA není nutné řešení časové synchronizace mezi jednotlivými moduly a tím možný vznik chyb z důvodu nedokonalé synchronizace a časového driftu. Dále nebylo zvoleno ToA kvůli nárokům na přesné časové intervaly v řádu mikrosekund, neboť elektromagnetická vlna urazí ve volném prostoru vzdálenost 1m za

$$t = \frac{d}{c} = \frac{1}{3 \cdot 10^8} = 3,333\mu\text{s}$$

což zvyšuje nároky na přesnost časové synchronizace. Tento problém není nutné řešit u RSSI.

2.2 Měřicí server - LoRaTM

2.2.1 Výběr komponent

Pro server bylo rozhodnuto užít rádiový modul RFM95 jako LoRaTM vysílače z důvodu nižší ceny a většího rozšíření oproti RN2483, nevýhodou RFM95 je neimplementovaný protokol LoRaWANTM. Z tohoto důvodu je nutné pro komunikaci naprogramovat implementaci tohoto protokolu.

Pro připojení serveru k Internetu bylo rozhodnuto užít WiFi SoC ESP8266, přesněji variantu ESP-12F. Provozní napětí senzoru je 3,3V, napájení je prováděno přes USB s úrovní 5V, takže je nutné užít stabilizátor (zde LT1763) pro stabilizaci napětí na nižší úroveň. Pro zajištění tohoto napětí i na UART při připojení USB převodníku je obvod doplněn IC TXB0104D pro změnu hladiny napětí.

ESP-12F [33] je WiFi SoC modul osazený 32bitovým procesorem Tensilica L106 vhodný pro implementaci komunikace přes WiFi do konstrukcí z důvodu, že dokáže pracovat jako AP i jako klient. Tento modul dovoluje odběr proudu cca 80 mA a vysílací výkon 20,5 dBm, komunikaci přes SPI, I²C a UART. Pro programování modulu je užito rozhraní UART, pro komunikaci s modulem je užita sběrnice SPI.

LT1763 [34] je stabilizátor vyvinutý společností Analog Devices, schopný dodání výstupního proudu 500mA. Obvod je vyráběn ve variantách s fixním a nastavitelným výstupním napětím, v zapojení je užita varianta s fixním výstupním napětím 3,3V. Tento obvod byl zvolen oproti původně zvolenému AMS1117 z důvodu lepších tepelných vlastností při srovnatelném klidovém proudu.

TXB0104D [35] je 4-bitový obvod měnící hladinu napětí mezi dvěma logickými úrovněmi vyvinutý společností Texas Instruments. Tento obvod dovoluje překlad 5 V logické hladiny UART na 3,3 V logickou hladinu zbylé desky. Oproti 2-bitové variantě TXB0102D byl zvolen z důvodu hromadného nákupu součástek, neboť je tento obvod použit na ostatních deskách pro překlad 5 V logické hladiny ISP konektoru.

2.2.2 Konstrukční řešení

Zapojení přístupové brány je v příloze na obrázku B.1. V zapojení jsou 3 tlačítka, PROG je připojen na GPIO0 a je určen pro režim načtení ESP8266, RELOAD je připojen na GPIO4 a je určen pro soft reset modulu pomocí přerušení a RST je připojen na $\overline{\text{RST}}$ pin ESP8266 a je iniciálně v logické 1, hard reset modulu probíhá jeho přechodem do logické 0. V základní konfiguraci je při startu pin GPIO v logické 1, což má za následek, že modul naběhne v normálním SPI režimu, pro programování přes UART je nutné jej nastavit při startu či restartu ESP8266 tlačítkem PROG do logické 0. Pro řízení komunikace mezi ESP8266 a RFM95 je kromě zapojené sběrnice SPI vyveden z pinu GPIO5 ESP8266 spoj do DIO0 RFM95, kterým je následně přes přerušení tato komunikace řízena. Modul je napájen přes konektor USB Micro. Návrh byl proveden v programu KiCad 5.

Při návrhu byla sledována délka cest sběrnice SPI, a to z důvodu, že komunikace na této sběrnici probíhá na kmitočtu 40MHz. Většinou se předpokládá, že cestu na PCB o délce $l > \frac{\lambda}{10}$ je již nutné považovat za přenosové vedení s rozprostřenými parametry. Tomuto odpovídá pro daný návrh situace

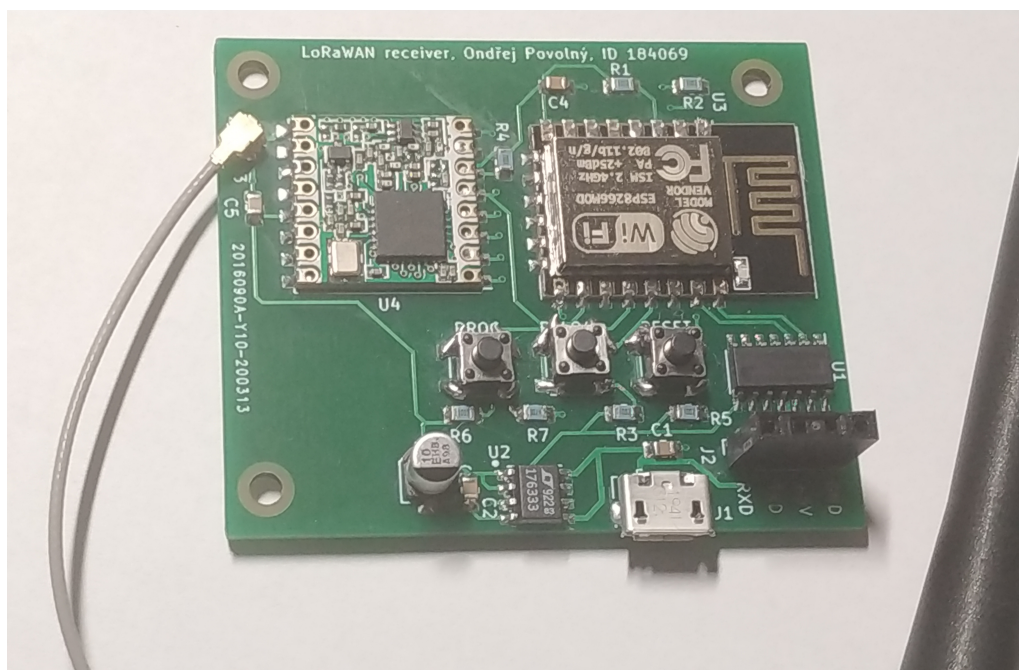
$$l > \frac{\lambda}{10} = \frac{v}{10f} \approx \frac{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}}{10f} \approx \frac{\frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{4,3}}}{10 \cdot 40 \cdot 10^6} \approx 36,16 \text{cm}$$

Osazená deska je zobrazena na obrázku 2.1

2.3 Uzel sítě LoRa™

2.3.1 Výběr komponent

Uzel sítě je zapojen jako jednoduché zapojení užívající SPI sběrnice, kde mikrokontrolér ATmega328P-AU řídí jako master RFM95, který je užit jako slave. Podobně



Obr. 2.1: Osazená deska LoRaTM měřicího serveru

jako v předchozím obvodu, pro překlad logických hladin je užit IC TXB0104D.

Mikrokontrolér (MCU)

Pro realizaci řízení senzoru je použit AVR mikrokontrolér ATmega328P-AU konfigurovaný jako Arduino (zapojení převzato z [36]), což je open source vývojová deska ([37]). Toto dovoluje urychlit návrh programu užitím databáze knihoven pro Arduino a možnost využití prostředí PlatfromIO.

ATmega328P-AU ([38]) je 8-bitový mikroprocesor vyvinutý společností Atmel, spadající pod AVR RISC architekturu mikroprocesorů. Výhodou je možnost provozního napětí 1,8 – 5,5V, podpora komunikace přes SPI a UART a dostatečný výkon pro nároky zařízení. Pro snížení spotřeby bylo užitě zapojení upraveno užitím 8MHz, toto dovoluje bezpečně snížit napájecí napětí na 3,3V (datasheet doporučuje pro kmitočet 10MHz minimální napětí 2,7V).

TLP5111 ([39]) je časovač s malým odběrem vyvinutý společností Texas Instruments. Jedná se o časovač určený pro periodické spínání obvodů, kde je kritická co nejmenší spotřeba (dle datasheetu pro napětí 2,5V je odběr proudu 35nA). Toto dovoluje uspat procesor úplně a tím snížit spotřebu (při úplném uspaní lze procesor probírat pouze externím přerušením či časovačem watchdog). Doba spínání je

Tab. 2.1: Technické parametry ATmega328P

Napětí	1,8 – 5,5V
Počet pinů	28 (DIP28), 32 (TQFP)
Maximální kmitočet	20 MHz
Architektura procesoru	AVR RISC, 8bit
SRAM [kB]	2
Flash [kB]	32
EEPROM [kB]	1

nastavena děličem na pinu DELAY a určí se vztahem

$$R_{\text{EXT}} = 100 \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - 100\tau)}}{2a} \right) \quad (2.1)$$

kde

τ požadovaný interval v sekundách

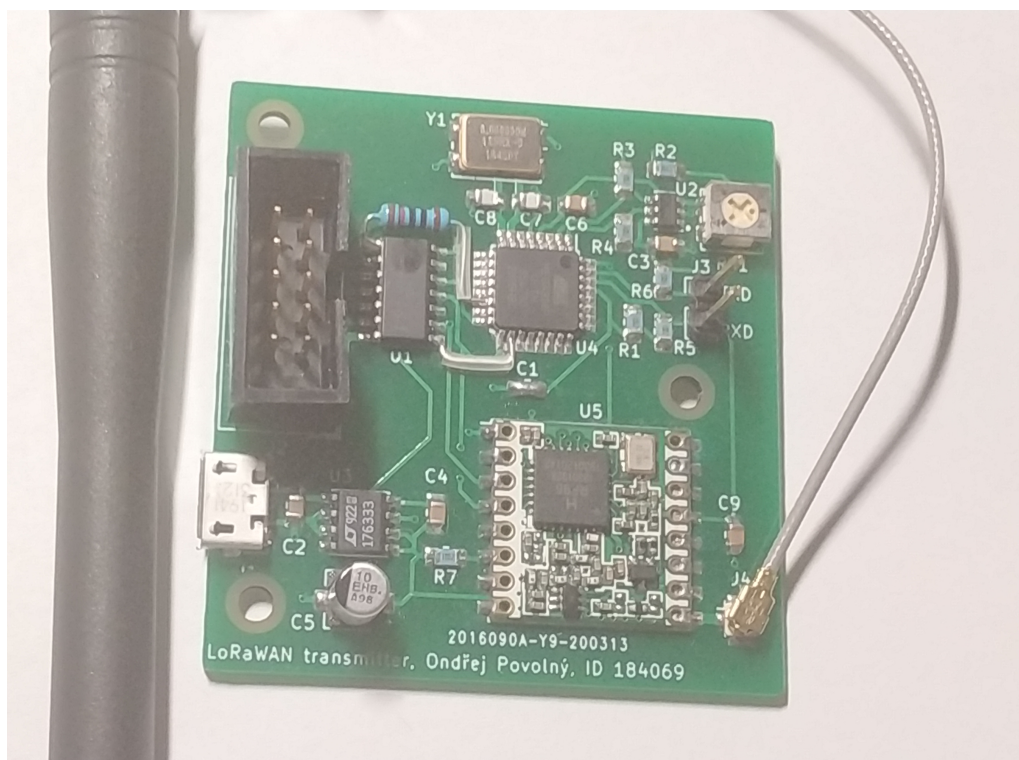
a, b, c koeficienty pro daný časový interval, uvedené v datasheetu.

Tento obvod je ve finální verzi nepoužit z důvodu programového řešení, které jej neutilizuje. Pokud by však bylo požadavkem snížení spotřeby, je možné uspání MCU do zdrojového kódu doplnit.

2.3.2 Konstrukční řešení

Zapojení je v příloze na obrázku A.1. Komunikace mezi MCU a RFM95 probíhá přes sběrnici SPI. Programování zařízení je prováděno užitím standardního 10pinového ISP konektoru, přičemž je díky TXB0104D zajištěno, aby logická úroveň byla nastavena na 3,3V pro zabránění poškození. Napájení desky je řešeno přes konektor USB Micro.

V původní variantě zapojení, které bylo vyrobeno jako deska, bylo nalezeno několik chyb, které byly modifikovány na prototypu a v zapojení a v návrhu desky opraveny. První opravou bylo vyřazení kondenzátoru mezi RST pinem ISP a RST pinem MCU. Tento kondenzátor tvořil RC článek typu horní propust s rezistorem R1, přičemž byl vyřazen, neboť se jednalo o chybu v zapojení (správně měl být připojen mezi RST a GND pro potlačení špiček na RST), která zamezovala naprogramování MCU. Dále byl doplněn spoj mezi AVCC a VCC dle návrhových doporučení (podle kterých nesmí být rozdíl napětí AVCC a VCC větší, jak 0,3 V. Jako posledním doplněním byl vložen rezistor 10kΩ mezi VCC a NSS, aby nedocházelo k ovlivňování RFM95 při programování MCU. Výslednou desku se podařilo v pořádku oživit. Osazená deska je zobrazena na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Osazená deska LoRa™ uzlu

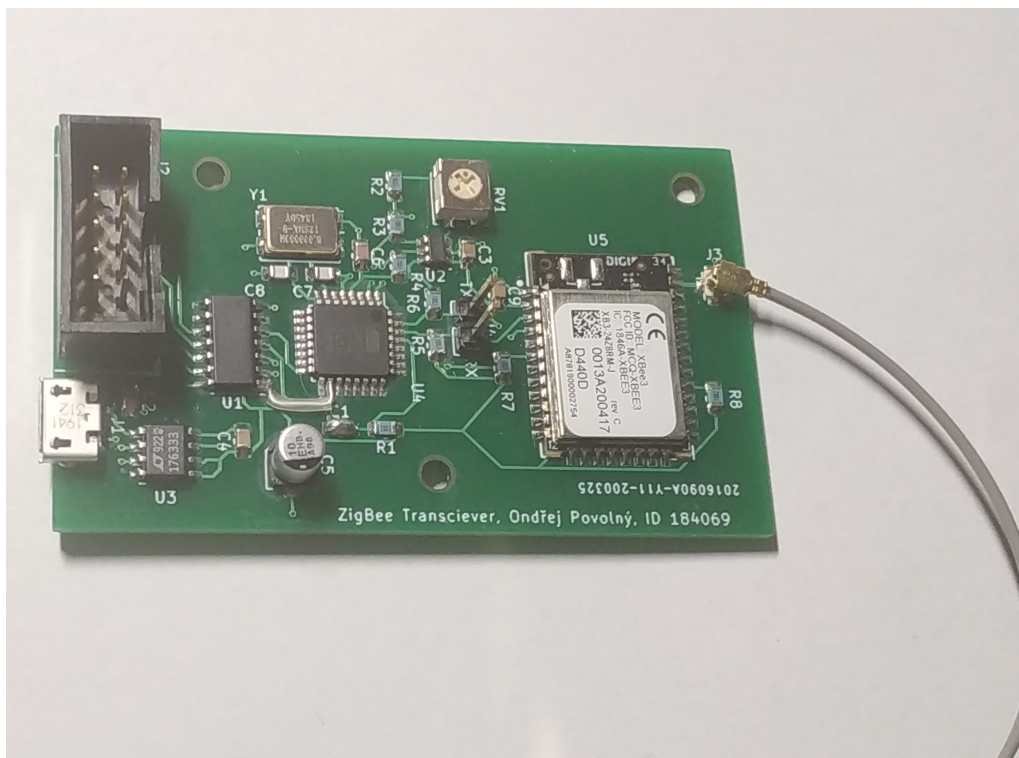
2.4 Uzel sítě/měřící server ZigBee

Zapojení je v příloze na obrázku C.1. Konstrukční řešení i použité součástky jsou podobné modulu uvedeném v kapitole 2.3, rozdílem je pouze užitý RF modul (Digi Xbee 3) a jeho komunikace s MCU, která probíhá přes UART. Bohužel tuto desku se nepodařilo oživit, podařilo se nahrání testovacího kódu, ale komunikace mezi MCU a RF modulem pomocí AT příkazů se nezdařila. V dalším textu je tedy již pouze probíráno měření pomocí technologie LoRa™

Osazená deska je zobrazena na obrázku 2.3

2.5 Programové řešení LoRa™

Programové řešení je děleno mezi dvě aplikace, a to aplikace uzlu a aplikace serveru. Obě aplikace byly napsány za použití frameworku PlatformIO [40] v IDE Code::Blocks, a to v programovacím jazyce C++ doplněného o knihovnu pro Arduino (Arduino.h), pro server o knihovny pro ovládání ESP8266 a řízení podpory OTA, NTP a mDNS a pro obě zařízení o knihovnu RadioHead [41]



Obr. 2.3: Osazená deska ZigBee modulu

2.5.1 Uzel sítě

Program nejdříve provede inicializaci pinů a parametrů. Zařízení má přidělen identifikátor reprezentovaný jako 1 byte hodnotu, a to 1-3. Modul následně kontroluje, zda byla obdržena synchronizační zpráva serveru, obsahující identifikátor modulu, a pokud ano, text **SYN**. Pokud tuto zprávu přijme, odpoví serveru potvrzující zprávou obsahující identifikátor a text **ACK**. Pokud přijme správný identifikátor, ale nepřijme správný text, odpoví serveru zprávou obsahující identifikátor a text **ERR**. Poté modul čeká, až obdrží další zprávu. Tímto je vyřešena kolize zpráv mezi 3 moduly, která by jinak nastávala v případě vysílání všech uzlů v jednom čase.

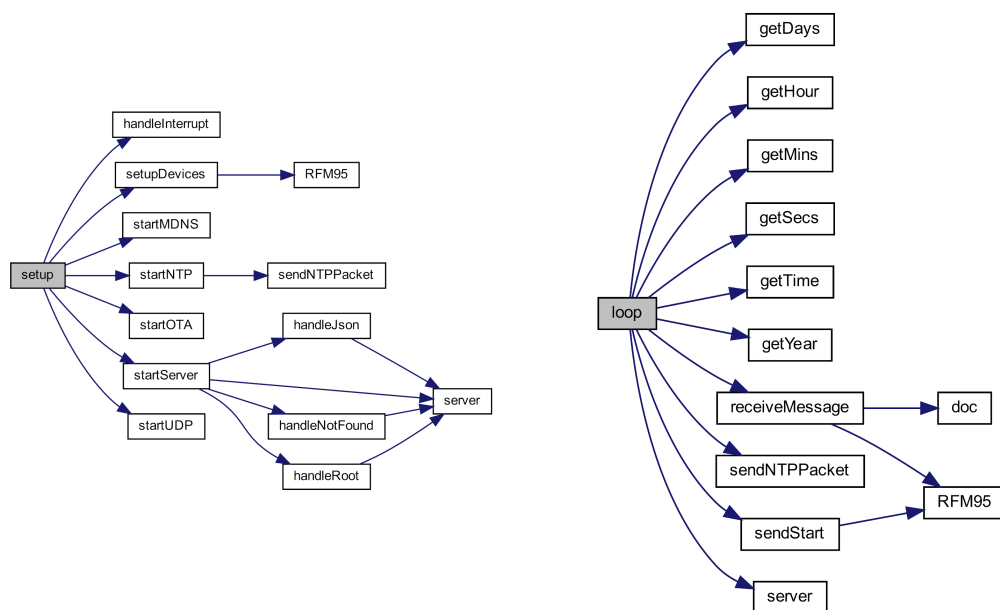
2.5.2 Měřicí server

Diagram volání funkcí vygenerovaný systémem Doxygen je na obrázku 2.4

Primární funkcí serveru je příjem dat z uzlů a provoz serveru pro přístup na síti WiFi. Data jsou odesílána metodou POST ve formátu JSON (JavaScript Object Notation) na doménu `http://esp8266lora.local/json`. Struktura JSONu je

Výpis 2.1: Struktura navrácené zprávy

```
[
  { 'data' : [
```



Obr. 2.4: Diagram volání funkcí serveru

```

{
    'id': identifikátor senzoru,
    'tx': čas vysílání,
    'rssi': síla přijatého signálu,
    'rx': čas příjmu,
},
{...},
],
    'time': časové razítko,
    'count': číslo měření.
},
{...},
...
]

```

Program podporuje užití NTP pro vytvoření časového razítka dle UNIXového času a OTA pro možnost modifikace nastavení ESP8266 bez nutnosti připojení UART. Na ESP8266 běží na portu 80 server, který dovoluje přístup v rámci lokální sítě (díky mDNS přes adresu <http://esp8266lora.local>) ke komunikaci, v případě přístupu na stránku <http://esp8266lora.local/json> je možné pozorovat zasílaný JSON.

2.6 Metodika a výsledky měření

Měření bylo inspirováno procesem měření uvedeném v [42]. V první řadě je nutné definovat některé parametry pro měření, přesněji rozmístění modulů a získání parametrů pro vyhodnocení získaných hodnot. Následně bylo provedeno potřebné měření a vyhodnocení všech výsledků.

Měření bylo provedeno v lokalitě zobrazené na obrázku 2.5, a to v nočních hodinách pro omezení rušení měření externími zdroji. V průběhu měření nebyl nikdo v měřicím prostoru přítomen. Jak je patrné z obrázku, v lokalitě je viditelné velké množství objektů způsobujících útlum. Veškeré měřicí moduly byly umístěny ve stejné výšce 1,5 m, simulující umístění modulu např. v rámci náprsní kapsy.

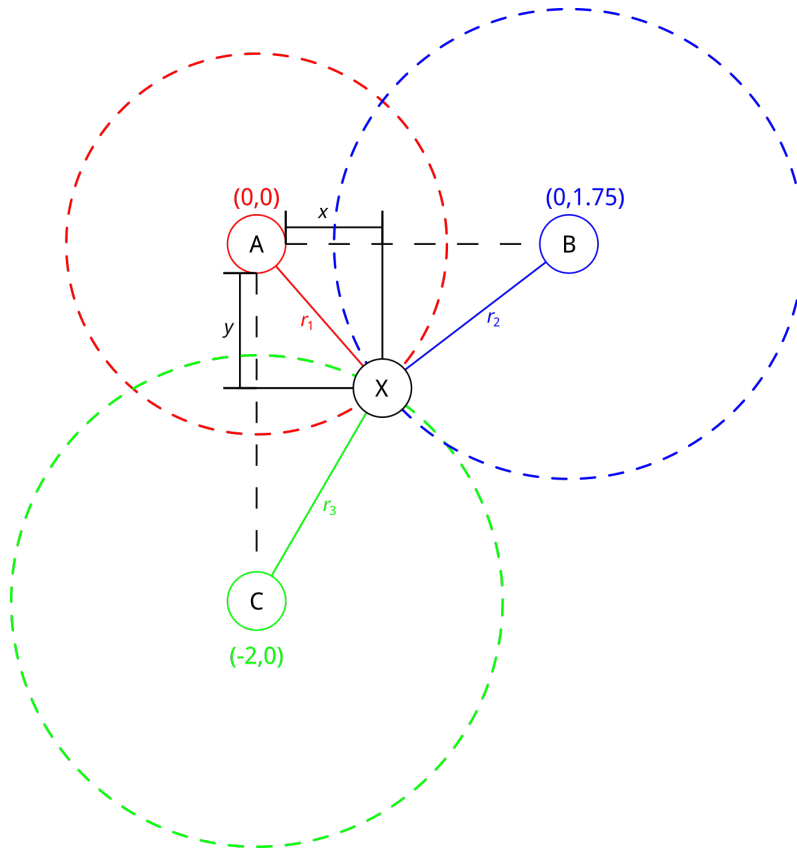


Obr. 2.5: Měřicí lokalita

Bylo provedeno měření celkem 9 hodnot vzdálenosti se souřadnicemi $(x, y) = (d, -d)$. Mezi $d = 0,1$ m a $d = 0,5$ m bylo změřeno celkem 5 hodnot, následně byly změřeny hodnoty $d = \{0,7, 0,9, 1,0, 1,2\}$ m. Pro každou vzdálenost bylo provedeno 10 měření pro snížení propagace možných chyb a byl určen jejich aritmetický průměr.

2.6.1 Rozmístění modulů

Schématické rozmístění modulů je zobrazeno na obrázku 2.6. Jak je patrné z rozmístěných modulů, definujeme jeden z nich jako počátek souřadné soustavy $(0,0)$, tento uzel je označen na obrázku 2.6 jako A. Jako další moduly B a C jsou uzly sítě, které jsou umístěny v případě uzlu B v pozitivní ose x ve vzdálenosti 1,75 m a v případě uzlu C v negativní ose y ve vzdálenosti 2 m od uzlu A. Uzel D je server na známých souřadnicích (x, y) . Pro trilateraci poté definujeme 3 kružnice se středem S_n v uzlu a poloměrem r_n daným jako úsečku mezi středem S_n a souřadnicemi serveru (x, y) .



Obr. 2.6: Schéma rozmístění modulů

Dostaneme poté soustavu 3 rovnic o 2 neznámých (x, y) ve tvaru

$$r_1^2 = x^2 + y^2 \quad (2.2)$$

$$r_2^2 = (x - 1,75)^2 + y^2 \quad (2.3)$$

$$r_3^2 = x^2 + (y + 2)^2 \quad (2.4)$$

Úpravou této soustavy poté dostaneme pro souřadnice vztahy

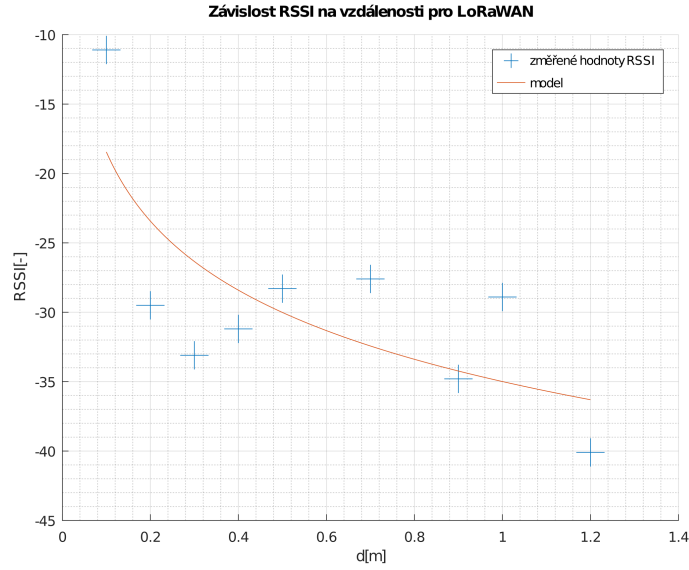
$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + 1,75^2}{2 \cdot 1,75} \quad (2.5)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + 2^2}{2 \cdot (-2)} \quad (2.6)$$

2.6.2 Získání hodnot modelu

Pro vyhodnocení měření bylo nejdříve nutné získat parametry modelu. Pro toto bylo provedeno nejdříve měření pouze s referenčním uzlem A a se serverem. Výsledkem byl soubor hodnot, který byl pomocí GNU Octave vykreslen do grafu 2.7.

Též byla provedena regresní analýza pro nalezení parametrů pro model určený rovnicí (1.12). Tímto byl zjištěn koeficient ztrát $\mu = 1,654$, výkon signálu v referenční



Obr. 2.7: Závislost RSSI na vzdálenosti

vzdálenosti $C = -34,99$ dBm a koeficient determinace $R^2 = 0,555$. Jak je patrné z koeficientu determinace, užitý model je použitelný, ale není úplně vhodný pro uvedené měření. Pro užití obecného modelu daného vztahem (1.11) by však bylo nutné provádět měření ve větší vzdálenosti. Dalším důvodem nízkého koeficientu determinace je užití hodnot se vzdálenosti menší, než je δ_0 , pro které model přestává platit. Z tohoto důvodu budou výsledné hodnoty značně zkreslené.

2.6.3 Vyhodnocení měření

Měřením a analýzou byla získána tabulka 2.2. Chyba byla určena vztahem

$$Error = \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2} \quad (2.7)$$

kde x_c a y_c jsou vypočtené hodnoty a x_r a y_r jsou skutečné hodnoty souřadnic.

Jak je z tabulky patrné, je chyba LoRa modulu značná (průměrná chyba činí 13,02 m s variancí 117,2 m). Tato chyba je však způsobena tím, že užitý model platí pro vzdálenosti větší, než je referenční vzdálenost. Při nesplnění této podmínky poté dojde ke značnému zkreslení. Pokud tedy předpokládáme, že uijeme pouze hodnoty vzdálenosti větší jak $\delta_0 = 1$ m, čemuž odpovídají souřadnice (0,7;0,7) (souřadnice serveru představují délky stran čtverce, vzdálenost mezi referenčním uzlem a serverem je tedy získána jako úhlopříčka), dostaneme průměrnou chybu 1,55 m s variancí 6,234 m.

Zlepšení přesnosti je možné např. užitím jiného modelu (pro který je však nutné změřit více hodnot ve větší vzdálenosti, což bohužel kvůli aktuálnímu stavu nebylo

Souřadnice serveru		Změřené hodnoty		
x	y	x	y	chyba
0,1	-0,1	-0,6044	2,430	2,626
0,2	-0,2	-15,29	64,54	66,57
0,3	-0,3	-1,924	-0,7224	2,264
0,4	-0,4	-38,54	0,4863	38,95
0,5	-0,5	0,09462	-0,1372	0,5440
0,7	-0,7	-0,3063	-0,2899	1,087
0,9	-0,9	0,4283	-0,4304	0,6657
1	-1	0,7106	-1,001	0,2893
1,2	-1,2	-2,977	-1,548	4,192

Tab. 2.2: Výsledné hodnoty modelu a vypočtená chyba v metrech

možné), případně provedením měření v prostoru, který bude vykazovat menší útlum a bude tím bližší volnému prostoru. Další možností je použití většího množství měřících uzlů sítě, čímž by bylo možné kompenzovat nedostatky měřícího prostoru doplněním kompenzačních rovnic do (2.4).

3 Závěr

V bakalářské práci byla prováděna analýza možných metod pro lokalizaci objektů a základní přehled existujících IoT technologií LoRaWANTMa ZigBee. Pro každou z technologií byly představeny některé existující moduly na trhu, ze kterých byl vybrán užitý modul, který byl následně použit pro praktickou realizaci měřících modulů.

V praktické části je prezentováno hardwarové řešení s využitím zvolených modulů RFM95 pro LoRaWANTMa Digi Xbee 3 pro ZigBee. Pro každý modul byly navrženy měřicí desky plošných spojů, které byly následně oživeny. Bohužel došlo k problému s oživením desek pro ZigBee, z tohoto důvodu byl dokončen návrh pouze pro LoRaWANTM.

Dalším prvkem praktické části je softwarové řešení systému pro lokalizaci s využitím technologie LoRaWANTM. Byla navržena řídicí aplikace pro server i uzly sítě v programovacím jazyce C++, tyto aplikace byly následně použity pro oživení a provedení základního testování jednotlivých desek. Z důvodu aktuálního stavu nemohlo být provedeno testování v původně zvolené lokalitě, z tohoto důvodu bylo testování provedeno pouze omezeně pro prezentování metodiky původně zamýšleného procesu testování.

Z důvodu omezeného testování vykazují získaná data velké odchylky, které jsou shrnuty v kapitole 2.6.3, z omezených dat je však možné sledovat, že využitelnost LoRaWANTMje v dané konfiguraci omezená. Dalším důvodem vzniklých odchylek je měření v neadekvátní vzdálenosti, což bylo podmíněno problematickým měřícím prostorem, který nedovoľoval měření ve větší vzdálenosti jak 1,7m. V praktické části je též shrnuto několik možností pro minimalizaci chyby měření a jejich možná realizace.

Veškeré podklady byly uvolněny pod dvouřádkovou BSD licenci na repozitář https://bitbucket.org/remogeus/lora_zigbee_modules.

Literatura

- [1] *Overview of the Internet of things*. 1. Geneva: International Telecommunication Union, 2012. Dostupné také z: <<http://handle.itu.int/11.1002/1000/11559-en?locatt=format:pdf&auth>>
- [2] ASHTON, Kevin. That 'Internet of Things' Thing. In: *RFID Journal* [online]. Hauppauge, NY: Emerald Expositions, 2009 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing>>
- [3] The "Only" Coke Machine on the Internet. In: *CMU SCS Coke Machine* [online]. Pittsburgh: Carnegie Mellon School of Computer Science, 2005 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.cs.cmu.edu/~coke/history_long.txt>
- [4] WEISER, Mark. The Computer for the 21st Century. *Scientific American*. 1991, **265**(3), 94-105. ISSN 0036-8733. Dostupné také z: <<https://www.lri.fr/~mbl/Stanford/CS477/papers/Weiser-SciAm.pdf>>
- [5] EVANS, D. The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything. [online] 11, San Jose: Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf>
- [6] Intelligent Illumination at a Dutch Seaport. In: *Twilight - Empowering Intelligence...* [online]. Amsterdam: TVILIGHT, c2012-2017 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.tvilight.com/2017/10/12/intelligent-illumination-at-a-dutch-seaport/>>
- [7] SILVA, Pedro, Ville KASEVA a Elena LOHAN. Wireless Positioning in IoT: A Look at Current and Future Trends. *Sensors* [online]. 2018, **18**(8), 19 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.3390/s18082470. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2470>>
- [8] DARDARI, Davide, Andrea CONTI, Ulric FERNER, Andrea GIORGETTI a Moe Z. WIN. Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2009, **97**(2), 404-426 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1109/JPROC.2008.2008846. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4802191/>>
- [9] ROBERTS, Rick. *TDOA Localization Techniques: IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)* [online]. Harris Corporation, , 11 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.enrique dans.com/wp-content/uploads/2013/03/TDOA-localization-techniques.pdf>>

- [10] ZANELLA, Andrea. Best Practice in RSS Measurements and Ranging. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2016, **18**(4), 2662-2686 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1109/COMST.2016.2553452. ISSN 1553-877X. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7451182/>>
- [11] *LoRaWAN 1.1 Regional Parameters*. San Ramon: LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup, 2018. Dostupné také z: <https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_regional_parameters_v1.1rb_-_final.pdf>
- [12] Bluetooth 5.0: What's Different, and Why it Matters. HOFFMAN, Chris. *How-To Geek* [online]. Potomac Falls: LifeSavvy Media, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.howtogeek.com/343718/whats-different-in-bluetooth-5.0/>>
- [13] ISM Applications. In: *Frequently asked questions* [online]. Geneva: International Telecommunication Union, 2008 [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: <<https://www.itu.int/net/ITU-R/terrestrial/faq/index.html#g013>>
- [14] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/01.2019-1 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu*. 1. Praha: Český telekomunikační úřad, 2019. Dostupné také z: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vseobecne-opravneni-c.vo-r/10/01.2019-1/obrazky/vo-r10-012019-1.pdf>>
- [15] When to Use Zigbee. *Zigbee Alliance* [online]. Davis (Kalifornie): ZigBee Alliance, [2020] [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://zigbeealliance.org/why-zigbee/when-to-use/>>
- [16] MARINCIC, Antonija, Antun KERNER a Dina SIMUNIC. Interoperability of IoT wireless technologies in ambient assisted living environments. *2016 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 1-6 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1109/WTS.2016.7482046. ISBN 978-1-5090-0314-3. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7482046/>>
- [17] Device types. *IoT Solutions Provider, Hardware, and Wireless Design Services / Digi International* [online]. Hopkins (Minnesota): Digi International, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002002/Concepts/c_device_types.htm?TocPath=Zigbee%20networks%7CZigbee%20networking%20concepts%7C___1>

- [18] List of commercial gateways. *The Things Network* [online]. Amsterdam: The Things Network, c2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/start/list.html>>
- [19] The Things Gateway. In: *The Things Network* [online]. Amsterdam: The Things Network, c2018 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/gateway/>>
- [20] MultiTech Developer Resources »MTAC-LoRa Cards. *MultiTech Developer Resources* [online]. Mounds View (Minnesota): Multi-Tech Systems, c2010-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.multitech.net/developer/products/multiconnect-conduit-platform/accessory-cards/mtac-lora/>>
- [21] Sentiur RG1xx LoRaWAN Gateway + Wi-Fi / Ethernet + Optional LTE (US Only). *Wireless Module, Antenna & IoT Manufacturer / Laird Connectivity* [online]. Akron (Ohio): Laird Connectivity, c2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.lairdconnect.com/wireless-modules/lorawan-solutions/sentrius-rg1xx-lorawan-gateway-wi-fi-ethernet-optional-lte-us-only>>
- [22] IC880A-SPI LoRa® Concentrator – Wireless Solutions. *Wireless Solutions – by IMST* [online]. Kamp-Lintfort: IMST, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://wireless-solutions.de/products/lora/radio-modules/ic880a-spi/>>
- [23] Designed for developers from the IoT world: the heavy-duty RAK831 from RAKwireless - RAKwireless - IoT Made Easy. In: *RAKwireless - IoT Made Easy* [online]. Shenzhen: RAKwireless, c2014-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.rakwireless.com/en-us/products/lpwan-gateways-and-concentrators/rak831>>
- [24] RN2483 - Wireless Modules. In: *Smart / Connected / Secure / Microchip Technology* [online]. Chandler (Arizona): Microchip Technology, c1998-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>>
- [25] RN2483 Low-Power Long Range LoRa Technology Transceiver Module Data Sheet. In: *Smart / Connected / Secure / Microchip Technology* [online]. Chandler (Arizona): Microchip Technology, c1998-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/>>

- RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-Data-Sheet-DS.pdf>
- [26] RFM95W feature the LoRa™ long range model. In: *Professional RF IC modules and Digital Sensor designer and manufacturer Shenzhen Hope Microelectronics Co., Ltd* [online]. Shenzhen: Hope Microelectronics, c2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html>>
 - [27] Low Power Long Range Transceiver Module: Model No.: RFM95W/96W/98W. In: *Professional RF IC modules and Digital Sensor designer and manufacturer Shenzhen Hope Microelectronics Co., Ltd* [online]. Shenzhen: Hope Microelectronics, c2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>>
 - [28] LoRaWAN Certified(CM) Products. In: *Home page / LoRa Alliance* [online]. Fremont: LoRa Alliance, c2018 [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <<https://loro-alliance.org/lorawan-certified-products>>
 - [29] Smart Home - Zigbee Alliance. *Zigbee Alliance* [online]. Davis (Kalifornie): ZigBee Alliance, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://zigbeealliance.org/market-uses/smart-home/>>
 - [30] Digi ConnectCore 6+ SBC datasheet. In: *IoT Solutions Provider, Hardware, and Wireless Design Services / Digi International* [online]. Hopkins (Minnesota): Digi International, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.digi.com/pdf/ds-connectcore6-plus-sbc.pdf>>
 - [31] Digi XBee 3 Zigbee 3.0. In: *IoT Solutions Provider, Hardware, and Wireless Design Services / Digi International* [online]. Hopkins (Minnesota): Digi International, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <<https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/2-4-ghz-modules/xbee3-zigbee-3>>
 - [32] Digi XBee 3 Zigbee 3.0 datasheet. In: *IoT Solutions Provider, Hardware, and Wireless Design Services / Digi International* [online]. Hopkins (Minnesota): Digi International, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.digi.com/pdf/ds_xbee-3-zigbee-3.pdf>
 - [33] ESP-12F Datasheet. In: *Ai-Thinker* [online]. Shenzhen: Ai-Thinker, c2020, c2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://wiki.ai-thinker.com/_media/esp8266/a014ps01.pdf>

- [34] LT1763 Series — 500mA, Low Noise, LDO Micropower Regulators. In: *Mixed-signal and digital signal processing ICs / Analog Devices* [online]. Norwood (Massachusetts): Analog Devices, c1995-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1763fh.pdf>
- [35] TXB0104 4-Bit Bidirectional Voltage-level Translator With Automatic Direction Sensing and ± 15 -kV ESD Protection datasheet (Rev. I). In: *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments* [online]. Dallas (Texas): Texas Instruments, c1995-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/txb0104.pdf?ts=1591046377805>
- [36] Arduino na nepájivém poli. SLINTÁK, Vlastimil. *Arduino Dokumentace* [online]. Vlastimil Slinták, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://docs.uart.cz/docs/uduino/>
- [37] Arduino - Introduction. *Arduino* [online]. Ivrea (Itálie): Arduino, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [38] ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. In: *Smart / Connected / Secure / Microchip Technology* [online]. Chandler (Arizona): Microchip Technology, c1998-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [39] TPL5111 Nano-Power System Timer for Power Gating datasheet (Rev. B). In: *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments* [online]. Dallas (Texas): Texas Instruments, c1995-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpl5111.pdf>
- [40] A new generation ecosystem for embedded development · PlatformIO. *A new generation ecosystem for embedded development · PlatformIO* [online]. PlatformIO, c2014-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://platformio.org/>
- [41] RadioHead: RadioHead Packet Radio library for embedded microprocessors. *RadioHead* [online]. Mike McCauley, c2011-2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/RadioHead/>
- [42] SADOWSKI, Sebastian a Petros SPACHOS. RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things. *IEEE Access* [online]. 2018, **6**, 30149-30161 [cit.

2020-06-02]. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2843325. ISSN 2169-3536. Dostupné
z: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8371230/>>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

3G	Third generation – třetí generace mobilních telekomunikačních technologií
AES	Advanced Encryption Standard – standard pokročilého šifrování
API	Application Programming Interface
AT	Attention commands – ovládací příkazy pro řízení modemů
AoA	Angle of Arrival – úhel přijetí signálu
CSS	Chirp Spread Spectrum – rozprostření pomocí chirpů
DS-SS	Direct Sequence Spread Spectrum – přímé rozprostření pomocí kódu
FSK	Frequency Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GNSS	Global Navigation Satellite System – globální navigační satelitní systém
GPS	Global Positioning System – globální poziční systém
HTML	Hypertext Markup Language – hypertextový značkovací jazyk
I²C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union – Mezinárodní telekomunikační unie
IoT	Internet of Things – internet věcí
JSON	JavaScript Object Notation – JavaScriptový objektový zápis
LPWAN	Low Power, Wide Area Network
LoRaWAN	LoRa Wide Area Network
LoRa	Long Range
MCU	Microcontroller Unit – jednočipový počítač

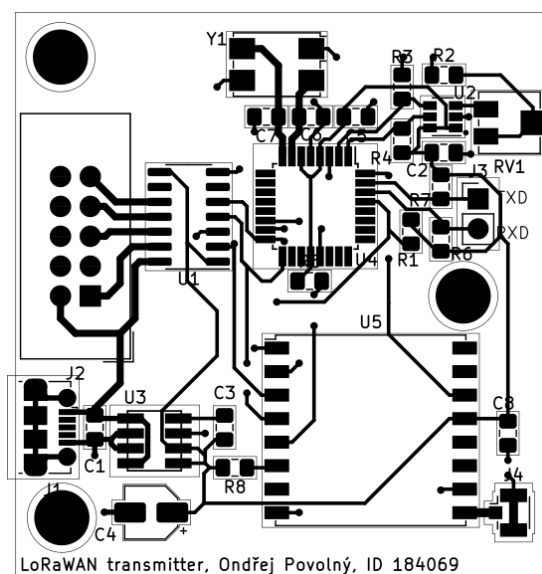
NSS	n Slave Select – řídící pin v SPI sběrnici, určující aktivní slave zařízení
NTP	Network Time Protocol – protokol pro synchronizaci času v paketové síti
OTA	Over-The-Air programming – bezdrátová možnost programování
PLM	Path-loss model
PSK	Phase Shift Keying
RFID	Radio-frequency identification – identifikace na rádiové frekvenci
RSS	Received signal strength – výkon přijatého signálu
SPI	Serial Peripheral Interface
SRD	Short Range Devices – zařízení krátkého dosahu
SoC	System on a Chip – systém na čipu
TDOA	Time Difference of Arrival – rozdíl přijetí signálu
TOF	Time of Flight – doba šíření signálu
TOA	Time of Arrival – doba přijetí signálu
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UNB	Ultra Narrowband – ultra úzké pásmo
USB	Universal Serial Bus
WPAN	Wireless Personal Area Network – bezdrátová osobní síť
mDNS	multicast Domain Name System – protokol pro překlad IP adres na jména domén v malé síti
τ_d	doba zpoždění odeslání zprávy
τ_r	doba šíření signálu prostorem pro dvoucestné ToA
τ_t	doba šíření signálu prostorem
C	výkon signálu v referenční vzdálenosti
RSSI	Received signal strength indicator – indikátor výkonu přijatého signálu
δ_0	referenční vzdálenost

δ_h	referenční vzdálenost pro h -tý segment
d	měřená vzdálenost
μ_h	koeficient ztrát šíření v daném segmentu
m	počet lineárních segmentů pro multi-slope PLM
v	rychlost šíření vlny prostorem
R^2	koeficient determinace

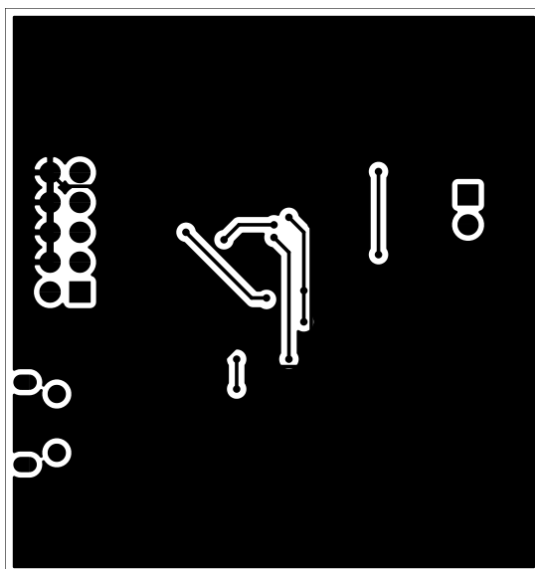
Seznam příloh

A	Měřicí server LoRa	48
A.1	Schéma zapojení	48
A.2	Deska plošného spoje serveru	49
B	Uzel sítě LoRa	50
B.1	Schéma zapojení	50
B.2	Deska plošného spoje serveru	51
C	ZigBee modul	52
C.1	Schéma zapojení	52
C.2	Deska plošného spoje	53
D	Obsah přiloženého CD	54

A.2 Deska plošného spoje serveru



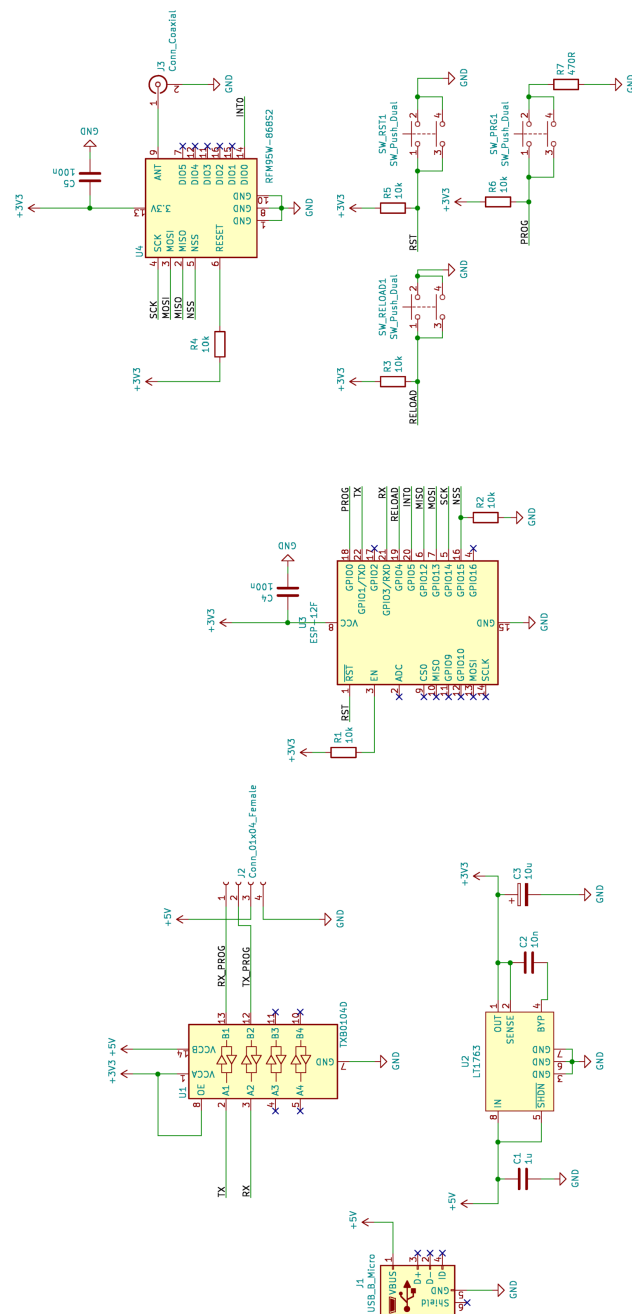
Obr. A.2: DPS serveru - strana součástek



Obr. A.3: DPS serveru - strana spojů

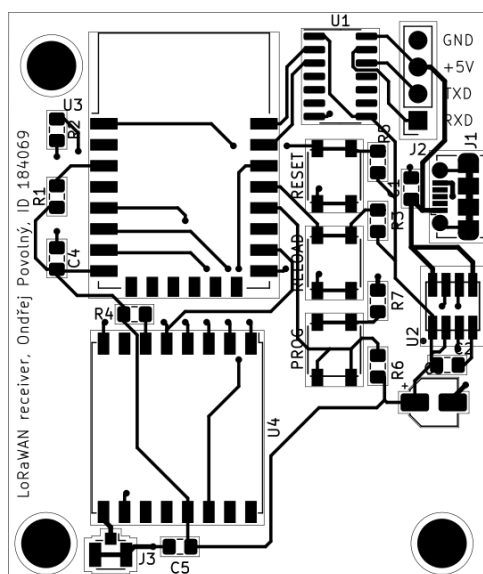
B Uzel sítě LoRa

B.1 Schéma zapojení

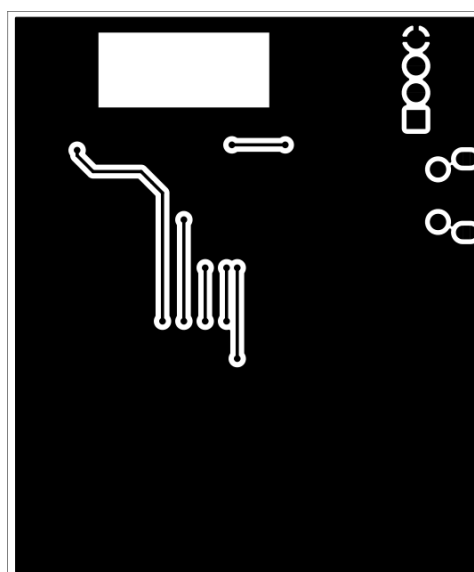


Obr. B.1: Schéma zapojení uzlu sítě

B.2 Deska plošného spoje serveru



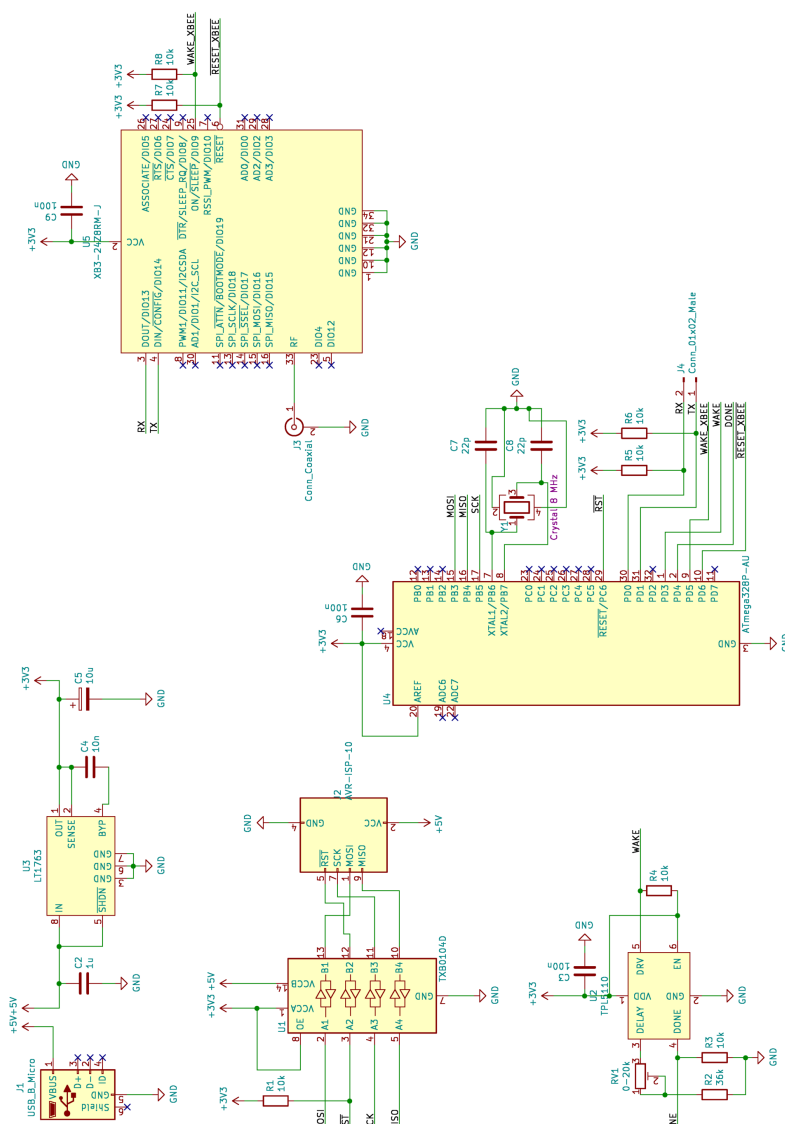
Obr. B.2: DPS uzlu - strana součástek



Obr. B.3: DPS uzlu - strana spojů

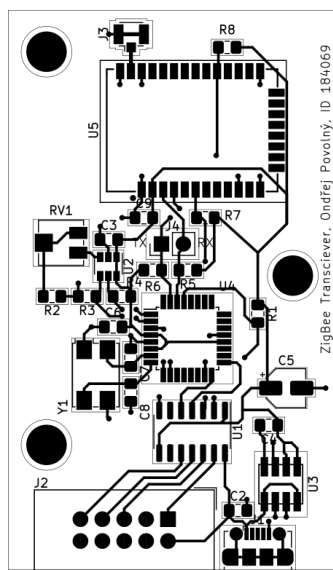
C ZigBee modul

C.1 Schéma zapojení

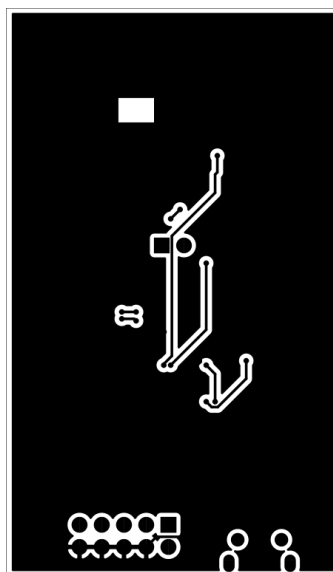


Obr. C.1: Schéma zapojení ZigBee modulu

C.2 Deska plošného spoje



Obr. C.2: DPS ZigBee modulu - strana součástek



Obr. C.3: DPS ZigBee modulu - strana spojů

D Obsah přiloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── src.tar.gz ..... zdrojové kódy
├── boards.tar.gz ..... desky plošných spojů
├── thesis.pdf ..... text bakalářské práce
├── docs/ ..... dokumentace ke zdrojovým kódům vygenerovaná přes Doxygen
│   ├── lora_tx.pdf ..... dokumentace pro uzel
│   └── lora_rx.pdf ..... dokumentace pro server
```